

Création de structures actives à l'aide d'alliages à mémoire de forme pour des applications dans le champ de la mobilité

H. TRAN^{a,c}, A. WAIBAYE^{b,c}, X. BALANDRAUD^{a,c}, J.F. DESTREBECQ^{b,c}

^a Clermont Université, Institut Français de Mécanique Avancée (IFMA), Institut Pascal, F-63171 Aubière, France

^b Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal – BP 10448, F-63000 Clermont Ferrand, France

^c CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171 Aubière, France

Résumé :

L'étude porte sur l'utilisation de fils en AMF pour créer des structures actives, capables d'adapter leur forme à des conditions de chargement variables. Il s'agit de modifier la géométrie d'une structure par simple variation de température des fils. Deux configurations ont été étudiées : avec fils en AMF placés en série ; avec fils d'AMF placés en parallèle. Un choix pertinent des températures de transformation de l'AMF par rapport à la température ambiante permet d'obtenir une évolution cyclique de la géométrie de la structure. Les résultats expérimentaux sont confrontés à un modèle analytique. Cette étude ouvre des perspectives vers les structures actives à base d'AMF dans le champ d'applications pour la mobilité.

Abstract:

The study deals with the application of SMA wires to create active structures able to adapt to their shape to variable conditions of loading. The objective is to modify the geometry of a structure by mere temperature variation of the wires. Two configurations were studied: with SMA wires placed in series; with SMA wires placed in parallel. A relevant choice of the transformation temperatures with respect to the ambient temperature enables us to obtain a cyclic evolution of the structure. The experimental results are compared with analytic model. This study opens a new way for the creation of active structures with SMAs in the application domain of mobility.

Mots clefs : alliage à mémoire de forme, structure active, expérimentation.

1 Introduction

Les alliages à mémoire de forme (AMF) sont des matériaux qui présentent des propriétés thermomécaniques spectaculaires. Parmi ces propriétés, on peut citer la pseudo-élasticité et l'effet mémoire [1]. D'une manière générale, les AMF sont caractérisés, en fonction de la température et de la contrainte, par deux phases cristallines différentes : l'austénite et la martensite. L'effet mémoire est activé thermiquement à partir d'un AMF qui contient une proportion de martensite orientée. Ainsi, des actionneurs ont été développés pour des applications aéronautiques, biomédicales et robotiques. En génie civil, des travaux ont visés à réaliser des structures adaptatives pour le contrôle des contraintes, de la fissuration ou des flèches [2-5].

Dans ce travail, le recours à une source d'énergie extérieure (échauffement par effet Joule) permet d'envisager la création de structures actives à base de fils d'AMF. L'AMF utilisé est un fil en nickel-titane de 1 mm de diamètre. Parmi ses diverses propriétés, c'est l'effet mémoire qui est mis à profit pour créer de la mobilité en se basant sur un principe de compensation de force et de déformation entre deux fils d'AMF. La figure 1 présente des exemples de systèmes basés sur ce principe. Si l'un des fils (ou groupe de fils) se raccourcit par retour à l'état austénitique sous l'effet d'un chauffage, l'autre fil (ou groupe de fils) resté à l'état martensitique s'allonge et le potentiel de déplacement est préservé. Ainsi, la figure 1-a montre que lorsque le fil AMF1 se raccourcit au chauffage, le fil AMF2 s'allonge à l'état martensitique, ce qui provoque la déformation du cadre articulé, et réciproquement.

Dans la présente étude, les systèmes décrits par les figures 1-b et 1-c sont étudiés. En fait, les deux premiers

systèmes peuvent être rapportés au modèle analogique de la figure 1-c. Deux fils identiques sont montés en série, reliés par un capteur de force au point milieu où se trouve également un capteur de déplacement. Dans une première partie, ce modèle analogique est utilisé pour l'analyse du système actif à partir de l'observation de l'évolution de la force dans les fils et du déplacement du point milieu. Dans un second temps, on s'intéresse au fonctionnement du système 1-b, constitué d'une poutre console en alliage d'aluminium associée à deux paires de fils d'AMF antagonistes disposés de part et d'autre de la poutre parallèlement à celle-ci. En particulier on examine l'évolution de la flèche induite par l'activation alternée des deux paires de fils. Enfin, un modèle pour l'analyse du fonctionnement du système analogique 1-c est présenté.

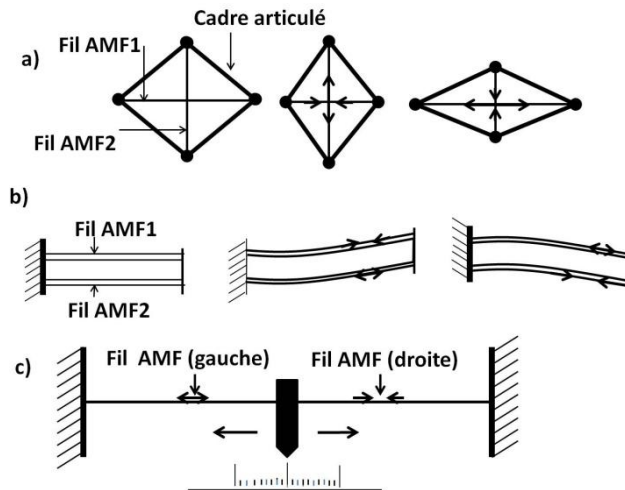


FIG. 1 – Exemples de structures actives à base de fils en AMF : les cas (b) et (c) font l'objet de ce travail.

2 Etudes expérimentales

2.1 Fils d'AMF utilisés

Les fils en AMF sont de type nickel-titane. Leur composition est $\text{Ni}_{50,8}\text{-Ti}_{49,2}$ (at.%). Leurs températures de transformation sont données dans le tableau 1 [6]. On note que la température ambiante ($18,5 \pm 1,5^\circ\text{C}$) est située entre les températures A_s et M_s . Ce tableau donne également les propriétés de l'AMF qui seront utilisées pour la modélisation (voir Section 3). La figure 2 illustre le diagramme d'état dans le plan contrainte-température (gauche), ainsi que le diagramme contrainte-déformation en traction uniaxiale depuis l'état austénitique (droite).

Symbole	Signification	Valeur	Unité
E	Module de Young	63	GPa
γ	Déformation de transformation totale $A \rightarrow M$	5,9	%
α	Pente de transformation	2,4	GPa
A_s	Température de début de transformation en austénite	24	$^\circ\text{C}$
A_f	Température de fin de transformation en austénite	40	$^\circ\text{C}$
M_s	Température de début de transformation en martensite	-7	$^\circ\text{C}$
M_f	Température de fin de transformation en martensite	-25	$^\circ\text{C}$
β	Pente dans le plan sigma-température	7	$\text{MPa}/^\circ\text{C}$

TAB. 1 – Propriétés de l'AMF utilisé [6].

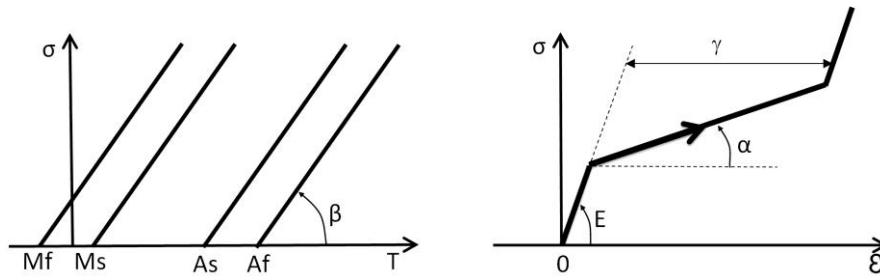


FIG. 2. – Gauche : diagramme contrainte-température ; Droite : courbe contrainte-déformation depuis l'état austénitique.

2.2 Dispositifs expérimentaux

L'objectif est de créer de la mobilité par activation de l'effet mémoire dans les fils d'AMF à partir d'une source d'énergie électrique permettant de chauffer les fils par effet Joule. Deux dispositifs ont été conçus. Ils utilisent tous les deux les éléments suivants : capteur de force, capteur LVDT, générateur de courant continu, ventilateur pour renouveler l'air à température ambiante, thermomètre pour mesurer la température ambiante. Les sous-sections ci-dessous décrivent les spécificités des deux dispositifs.

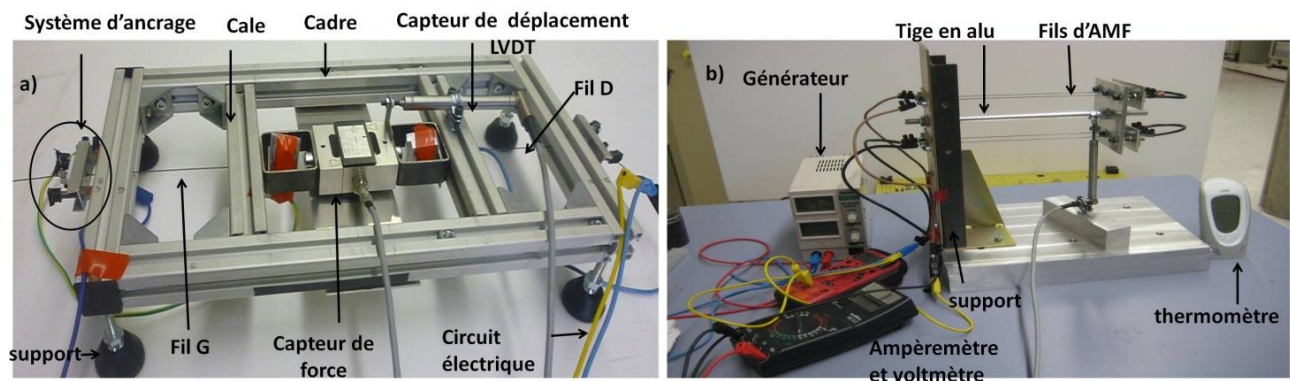


FIG. 3 – Gauche : système actif à deux fils en série ; Droite : poutre console avec 4 fils

2.2.1 Système avec deux fils en série

La figure 3-a montre le dispositif conçu pour les essais avec deux fils en série de 1 mm de diamètre et 174 mm de long. Ce dispositif est constitué d'un cadre en profilé d'aluminium, servant de bâti supposé indéformable. Pour simplifier l'écriture, on notera G le fil à gauche et D le fil à droite.

2.2.2 Poutre console avec 4 fils

La figure 3-b montre le dispositif réalisé pour les essais sur la poutre console équipée de 4 fils. La poutre est en alliage d'aluminium. Elle est cylindrique, de diamètre 10 mm et de longueur 200 mm. Les fils sont de diamètre 1 mm comme précédemment. Ils sont fixés au bâti à une extrémité, l'autre étant fixés à une plaque rigide solidaire de l'extrémité libre de la poutre. Deux fils « hauts » et deux fils « bas » sont disposés de part et d'autre de la poutre console, à ± 37 mm de son axe longitudinal.

2.3 Réalisation des essais

Suivant le principe adopté dans cette étude, les fils doivent être initialement dans un état martensitique pré-étiré. Pour cela, ils sont mis en place à l'état austénitique. Puis on leur impose un allongement par pré-étirement pour les amener dans un état de mélange austénite-martensite orientée, avant de les fixer à leurs deux extrémités. Une source d'énergie électrique permet de provoquer un effet Joule pour l'élévation de température nécessaire à l'activation de l'effet mémoire. On fait ainsi évoluer l'effort dans chaque fil, de manière à créer le déplacement du point milieu dans le cas (a), où la flèche de la poutre-console dans le cas (b). L'objectif est d'arriver à générer et à contrôler à l'aide des fils d'AMF la mobilité des systèmes actifs ainsi constitués.

2.3.1 Cas des deux fils en série

Les essais relatifs aux deux fils en série sont réalisés de la manière suivante :

- Etat initial : placement des deux fils à l'état austénitique.
- Etape 1 : pré-étirement des deux fils afin de les transformer en martensite partiellement orientée. On note la déformation initiale en pourcentage x_{init} de la déformation maximale de transformation de phase en traction uniaxiale (notée γ). Pour la suite $x_{init} = 45\%$ de γ .
- Etape 2 : chauffage du fil G jusqu'à le faire revenir complètement en austénite (en pratique 60°C environ). Le ventilateur est utilisé pour évacuer rapidement la chaleur latente de transformation de phase dans l'autre fil.
- Etape 3 : retour à la température ambiante du fil G (3 minutes environ sont nécessaires).
- Etape 4 : on reproduit l'étape 2, mais cette fois-ci pour le fil D en ventilant le fil G.
- Etape 5 : on reproduit l'étape 3, appliquée cette fois au fil D.
- Les étapes 2 à 5 sont répétées de manière cyclique.

On précise que la durée de la phase de chauffage durant les étapes 2 et 4 est déterminée en observant l'évolution de la force dans les fils : le chauffage est arrêté dès que la valeur de la force se stabilise (par simple observation visuelle de la valeur de la force affichée sur l'écran de l'ordinateur).

2.3.2 Cas de la poutre console avec 4 fils

Les étapes pour la poutre console sont les mêmes que pour les fils en série. La particularité est que les fils sont chauffés par paire. Dans un premier temps, les fils « hauts » sont chauffés tandis que les fils « bas » subissent un étirement martensitique (étape 2), avant de laisser le système revenir à température ambiante (étape 3). Puis ces deux étapes sont répétées de manière inversée pour les deux groupes de fils (étapes 4 et 5). Comme précédemment, la durée du chauffage est déterminée par observation de la mesure de la flèche.

2.4 Résultats et analyses

2.4.1 Cas des deux fils en série

La figure 4-a montre l'évolution de la force F dans les fils en fonction du déplacement ΔL du point milieu. On observe une courbe en forme de « papillon », avec une évolution entre le premier cycle (trait plein) et le second (trait pointillé). On observe aussi que les deux « ailes » ne sont pas symétriques.

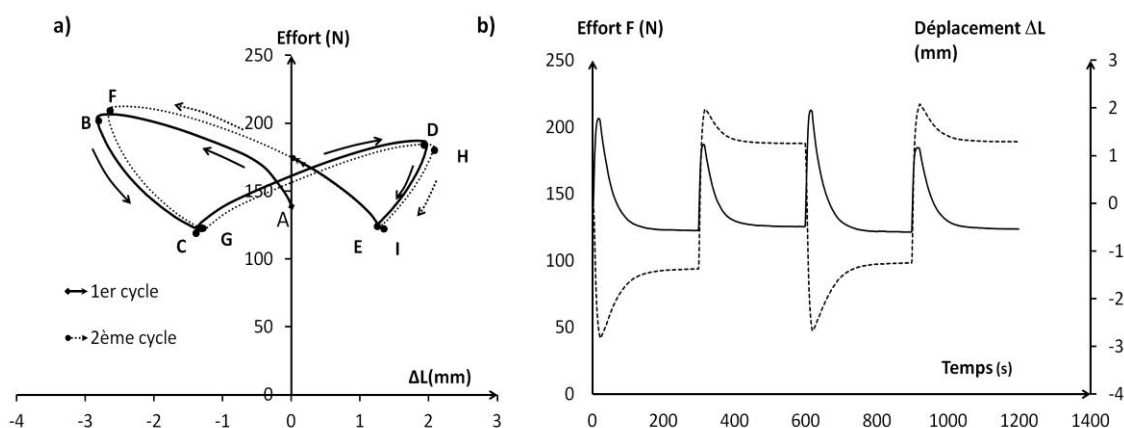


FIG. 4 – Gauche : force F dans les fils en fonction du déplacement ΔL du point milieu ; Droite : force dans les fils (trait plein) et déplacement ΔL du point milieu (trait pointillé) au cours des deux cycles.

Au chauffage du fil G (étape 2, du point A au point B sur la figure 4-a), celui-ci revient totalement à l'état austénitique : la martensite orientée présente initialement se transforme en austénite. On observe que ceci s'accompagne d'une augmentation de force dans les fils. En effet, le fil G cherche à se raccourcir du fait du retour en austénite pure. On voit effectivement sur la courbe en pointillé de la figure 4-b que le point milieu

se déplace vers la gauche (de la position 0 à la position -2.8 mm). La longueur totale des deux fils restant constante, ceci se traduit par un allongement du fil D : il poursuit donc sa transformation en martensite. Au retour à la température ambiante du fil G (étape 3, du point B vers le point C), on observe une diminution d'effort dans les fils et un déplacement du point milieu vers la droite. On verra que ceci est dû à la formation de martensite orientée dans le fil G lors de son refroidissement. On note toutefois que l'on ne revient pas à la position initiale : un déplacement résiduel est obtenu (position -1,38 mm).

On observe les mêmes phénomènes pour les étapes 4 et 5 (courbes CD et DE respectivement sur la figure 4-a). En répétant les étapes 2 à 5, on obtient un mouvement cyclique du point milieu (ligne pointillée).

2.4.2 Cas de la poutre console avec 4 fils

La figure 5 montre l'évolution de la flèche au cours des cycles et de son amplitude en fonction du pré-étirement des fils. Sur la figure 5-a, on observe que la variation de la flèche dépend du pré-étirement. Ceci s'explique par la proportion de martensite orientée qui varie en fonction du pré-étirement. Au chauffage des fils « hauts », ceux-ci raccourcissent et la flèche évolue vers le haut. On voit sur la figure 5-a que l'évolution de la flèche est positive dans ce cas : de 0 à 6.31 mm pour $\Delta L = 7$ mm. Ceci confirme le raccourcissement des fils « hauts » dû au retour en austénite, ce qui entraîne l'allongement des fils « bas » par augmentation de la proportion de martensite orientée dans ces fils. Au retour à la température ambiante, la flèche diminue et se stabilise à +3.57 mm. Dans l'étape suivante (chauffage des fils « bas »), la flèche diminue pour atteindre une valeur négative de -5.4 mm. Ceci résulte du raccourcissement des fils « bas » dû à leur retour à l'état austénitique, et d'un allongement des fils « hauts » par création d'une proportion de martensite orientée. Au retour à la température ambiante, la flèche diminue en valeur absolue et se stabilise à -2.6 mm.

Les flèches atteintes au premier cycle diffèrent de celles des autres cycles. A partir du deuxième cycle, les flèches maximales au chauffage et celles résiduelles après retour à température ambiante se stabilisent. Ceci permet de conclure que la réponse du système se stabilise au cours des cycles. Enfin, on observe sur la figure 5-b que les valeurs de la flèche au chauffage et après retour à température ambiante évoluent d'une façon quasi-linéaire en fonction du pré-étirement.

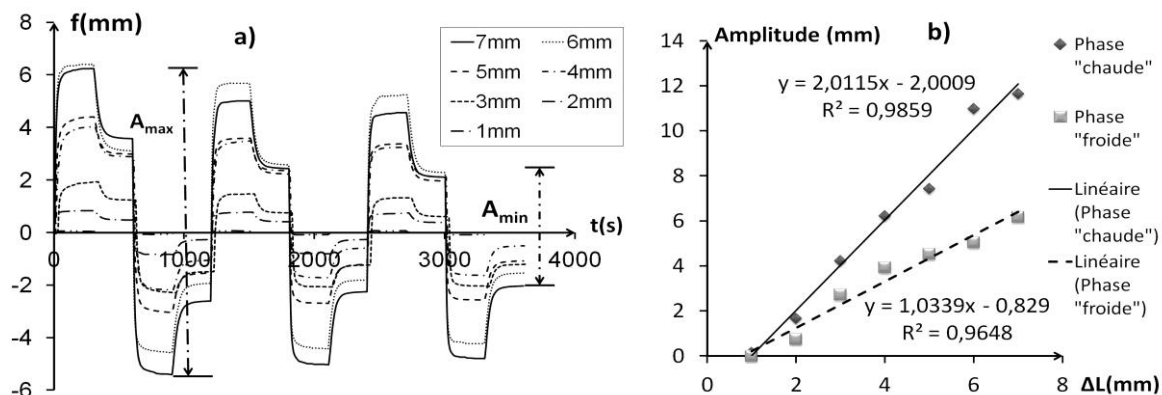


FIG. 5 – Gauche : Evolution de la flèche durant les cycles pour les différents pré-étirements ; Droite : Evolution de l'amplitude de la flèche en fonction du pré-étirement.

3 Modélisation

Un modèle a été établi pour analyser le fonctionnement du système analogique (a) avec les deux fils en série. Ce modèle permet de suivre l'évolution de l'état thermomécanique des fils et de simuler l'évolution de la force et du déplacement du point milieu au cours des cycles de chauffage-refroidissement.

Le principe de fonctionnement du modèle est schématisé par les graphiques présentés à la figure 6 pour un cycle complet. Dans l'état initial (étape 1), chaque fil est étiré à température ambiante à partir de l'état austénitique de manière à créer une proportion de martensite orientée $x_{init} = 0,45 \gamma$ (points 1). Ensuite, l'analyse repose sur l'équilibre de la force entre les deux fils (même contrainte à chaque instant dans les deux fils) et sur la compensation des déformations des deux fils de manière à garder une longueur totale constante. Il s'ensuit que les déplacements des points représentatifs de l'état d'équilibre mécanique des deux fils suivent des trajectoires symétriques sur les figures 6-a et 6-b.

Ainsi, à l'étape 2 le chauffage du fil G provoque son retour à l'état austénitique, ce qui entraîne le point milieu vers la gauche (point 2 sur la figure 6-a) en suivant une pente $-\alpha$; ceci provoque un étirement supplémentaire du fil D et une augmentation de la force (point 2 sur la figure 6-b). Au refroidissement (étape 3), le fil G revient dans un état partiellement martensitique en suivant une pente $-E$ (point 3 sur la figure 6-a), tandis que le fil D subit un déchargement partiel à l'état martensitique en suivant une pente E (point 3 sur la figure 6-b). Durant les étapes 4 et 5, les rôles des fils G et D sont inversés et les graphes sur les figures 6-a et 6-b se trouvent complétés de manière symétrique (points 4 et 5). On retrouve ainsi la forme en « papillon » obtenue lors des essais. Les figures 6-c et 6-d illustrent les évolutions de l'état thermomécanique des deux fils dans l'espace des phases pour les quatre étapes du cycle complet.

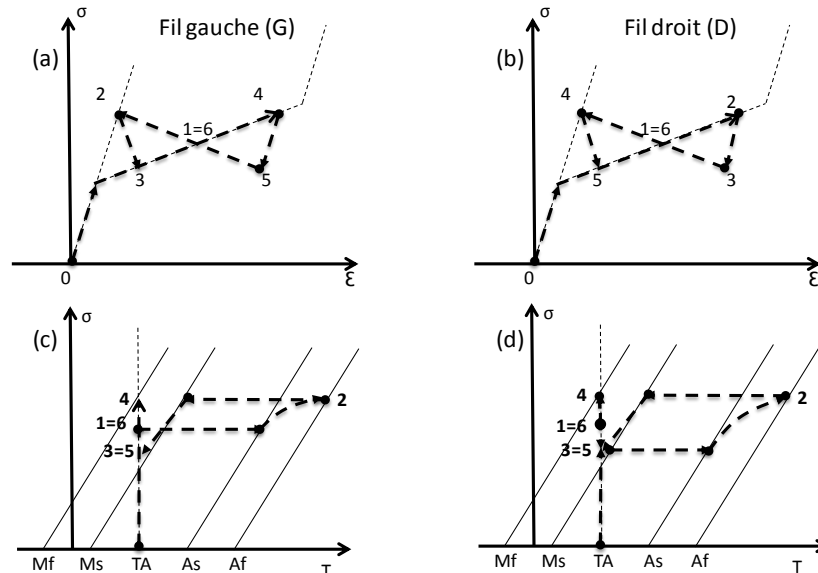


FIG. 6 – Evolution de l'équilibre thermomécanique du système à deux fils en série dans l'espace des phases et sous la forme de diagrammes contrainte-déformation pour un cycle complet.

4 Conclusion

Dans cette étude, on a étudié deux systèmes actifs à base de fils d'AMF en nickel-titane dont le fonctionnement est contrôlé par l'activation thermique de l'effet mémoire par effet Joule. Ces deux systèmes sont basés sur un principe de compensation de force et de déformation entre deux fils ou deux groupes de fils. Une série d'essais a permis de montrer que ce principe permet de préserver le potentiel de déplacement au cours de cycles répétés. L'analyse du fonctionnement du système analogique constitué de deux fils a permis de poser les bases pour la modélisation du fonctionnement de tels systèmes. En particulier, la mise en œuvre du modèle permet de retrouver les principales caractéristiques du fonctionnement observé au cours des essais.

Remerciements : Patricia HYRA et Charlie TOURNEBIZE, élèves-ingénieurs à l'IFMA.

Références :

- [1] Kauffman G. B. et al., The story of Nitinol: The serendipitous discovery of the memory metal and its applications, The Chemical Educator, vol. 2, 1-21, 1997.
- [2] Da Silva E. P., Beam shape feedback control by means of a shape memory actuator, Materials and Design, 28, 1592–1596, 2007.
- [3] Deng Z. et al., Behavior of concrete beam with embedded shape memory alloy wires, Engineering Structures, 28, 1691–1697, 2006.
- [4] Liu S. H. et al., Tracking control of shape memory alloy: actuators based on self sensing feedback and inverse hysteresis compensation, Sensors, 10, 112-127, 2010.
- [5] Mo Y.L. et al., Development and testing of a proof-of-concept smart concrete structure, Proceeding of smart structures technologies and earthquake engineering, Osaka, Japan, 2004.
- [6] Tran H., Création d'états de précontrainte dans des composants en béton par alliages à mémoire de forme : approche expérimentale et modélisation, Th. Doctorat, Univ. Blaise Pascal, Clermont-Fd, oct. 2012.